



### ABSTRACT

*A study of the spatial and temporal variations of the sea surface temperature, utilizing data obtained from sea surface, aircraft and satellite platforms is presented. The objective of the study is the evaluation and mapping of small scale variations in the sea surface temperature, caused by the thermal discharge from a nuclear power plant at Angra dos Reis, Brazil. Evaluation of data from ANGRA 01, the first experiment made on December 19, 1980, showed the surface temperature to be quite isothermal. Temperature from the aircraft and satellite radiometers were about 0.6°C and 5.0°C cooler, respectively, than the temperatures measured from the boat. These thermal offsets are readily accounted for by differences in emissivities of the sea surface and the intervening water vapor in the lower atmosphere.*

## SUMÁRIO

|                                  | <u>Pág.</u> |
|----------------------------------|-------------|
| LISTA DE TABELAS .....           | v           |
| 1. INTRODUÇÃO .....              | 1           |
| 2. METODOLOGIA .....             | 3           |
| 3. RESULTADOS PRELIMINARES ..... | 6           |
| 4. CONCLUSÕES .....              | 13          |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 15          |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1. Localização da área do experimento ANGRA 01 .....  | 2           |
| 2. Carta de distribuição da temperatura superficial na região da central nuclear .....  | 5           |
| 3. Perfil vertical da temperatura do ar e do vapor d'água precipitável .....  | 9           |
| 4. Comparação entre as temperaturas obtidas com o PRT-5 aerotransportado e as obtidas a nível de superfície .....               | 11          |
| 5. Mapa temático da distribuição de temperatura na área da central nuclear, com base na imagem do VISSR do satélite SMS-2 ..... | 12          |

## 1. INTRODUÇÃO

Para atender à crescente demanda de recursos energéticos exigidos pelo desenvolvimento econômico, o Brasil deverá complementar o potencial instalado com a implementação de centrais elétricas termonucleares. A localização dessas unidades depende, entre outros fatores, da disponibilidade de grandes quantidades de água para a refrigeração de seus sistemas e é de se esperar que elas sejam construídas próximas ou junto à costa, onde a água do mar possa ser aproveitada de forma eficiente e econômica. Neste caso, as grandes quantidades de calor liberadas com a água de refrigeração poderão provocar sensíveis alterações no campo de distribuição da temperatura marinha, na região do reator.

A primeira central nuclear brasileira, atualmente em fase de conclusão, está localizada próxima à Angra dos Reis - RJ (Figura 1), e estima-se que a sua descarga hidrotérmica possa provocar variações de até 8°C nas águas da região. Um projeto de pesquisa - Projeto ANGRA - está sendo conduzido com o objetivo de estudar os efeitos da massa de água aquecida no campo de temperatura preexistente na área. Utilizando técnicas de sensoriamento remoto, cuja eficiência no mapeamento térmico da superfície do mar tem sido amplamente confirmada na literatura (e.g. Stevenson et alii, 1979), o projeto prevê a realização de seis missões para a aquisição de dados que permitam o mapeamento térmico superficial das águas sob a influência da descarga térmica do reator. Esses dados são obtidos através de sensores instalados na aeronave de pesquisa do INPE e dos imageadores térmicos dos satélites meteorológicos NOAA-6 e SMS-2; um pequeno barco é utilizado para a medição amostral da temperatura da superfície, visando a calibração dos dados obtidos pelos sensores remotos. A primeira missão denominada ANGRA 01, foi realizada em 19 de dezembro de 1980, com o apoio parcial da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), e a apresentação de seus resultados preliminares constituem o objetivo deste relatório.

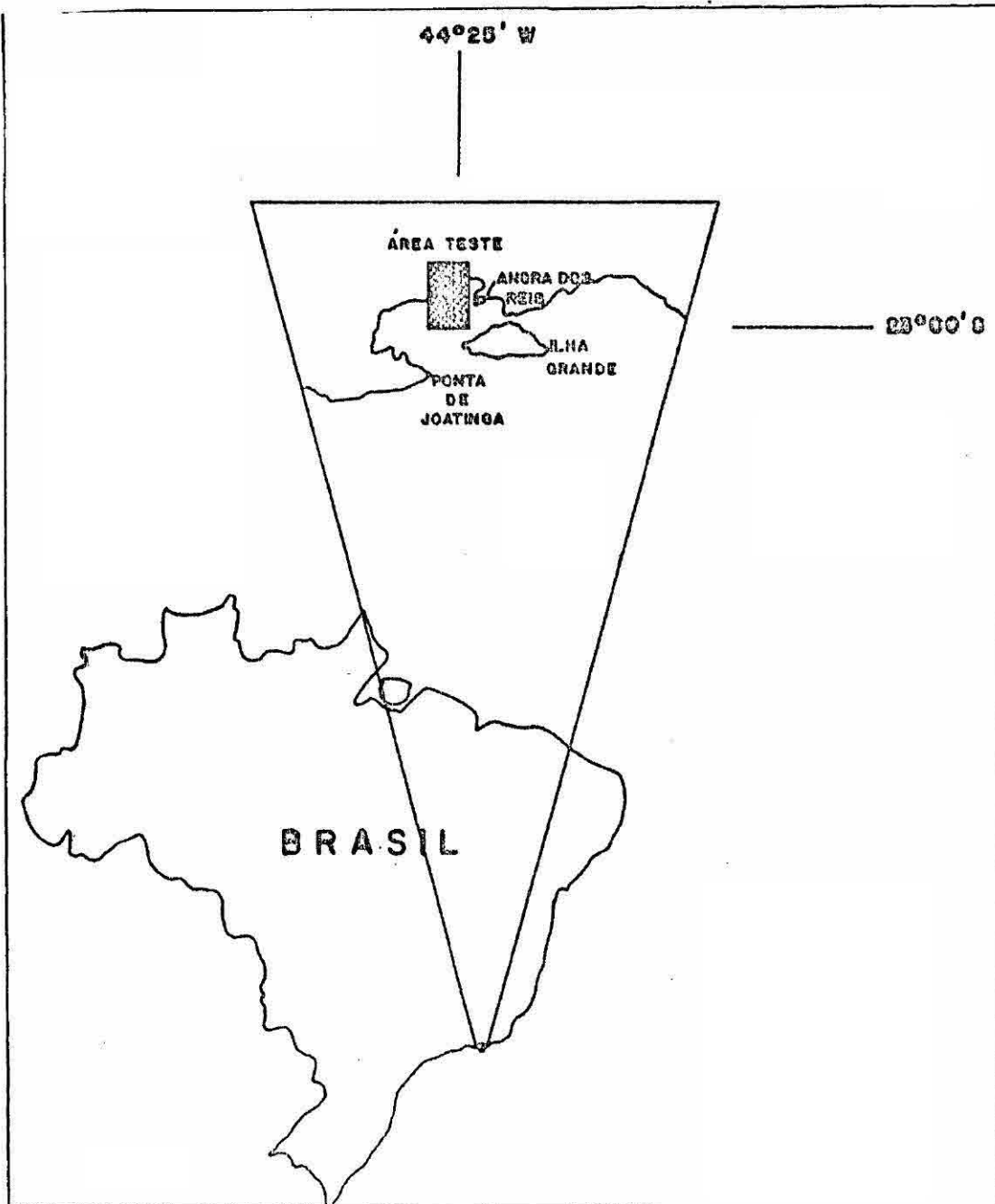


Fig. 1 - Localização da área do experimento ANGRA 01.

## 2. METODOLOGIA

Com o objetivo de realizar o mapeamento térmico da área de estudo foram analisados dados, obtidos em 19/12/1980, através das seguintes plataformas:

Satélites NOAA-6 e SMS-2

As imagens geradas pelos sistemas AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) do satélite polar NOAA-6 e VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) do satélite geostacionário SMS-2, foram gravadas pela estação de telemetria do INPE, no dia da missão, nos seguintes horários:

|                            |
|----------------------------|
| 07h00 (hora local) - AVHRR |
| 07h30 - VISSR              |
| 08h30 - VISSR              |
| 09h00 - VISSR              |

Essas imagens, gravadas em fitas CCT (Compatíveis com computador), foram analisadas no sistema GE/I-100 do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE, com o objetivo de avaliar a sua potencialidade na discriminação das características térmicas do mar, na região da central nuclear.

### Aeronave

Para o projeto ANGRA foi desenvolvida uma técnica de mapeamento térmico, baseada na medição e registro de temperatura radiométrica da superfície da água, ao longo de perfis predeterminados; conduzindo um conjunto formado por um radiômetro termométrico BARNES PRT-5 e um registrador analógico HP 680, a aeronave Bandeirante do INPE se deslocou ao longo de 18 linhas de vôo, mantendo uma altitude de 1000 m (Figura 2). Para permitir a recuperação precisa dos perfis radiométricos, os pontos de controle previamente definidos, foram fotografados durante o deslocamento da aeronave. Antes da missão, o sistema PRT-5/HP-680 foi calibrado, e a transformação do registro analógico em temperatura radiométrica obedeceu a equação:

$$T (^{\circ}\text{C}) = 3,93 Y - 3,24 \quad (1)$$

onde Y é o deslocamento do registro em cm/ $^{\circ}\text{C}$  e -3,24 o valor do "offset" em  $^{\circ}\text{C}$ . Após o vôo, os 18 registros foram reduzidos, segundo a equação acima, e as temperaturas obtidas foram lançadas, a intervalos regulares, sobre os perfis previamente recuperados sobre a carta náutica DHN/1608. A grade bidimensional obtida serviu de base para a geração da carta térmica da área. Após a aquisição dos dados radiométricos e fotogrâficos, a aeronave realizou uma ascensão helicoidal sobre a área, entre os níveis de 300 e 2500 m, durante a qual foram continuamente medidas as temperaturas de bulbo seco e úmido do ar exterior, para posterior análise da influência atmosférica sobre os dados obtidos com o radiômetro PRT-5.



DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO MAR NA REGIÃO DA CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA DOS REIS

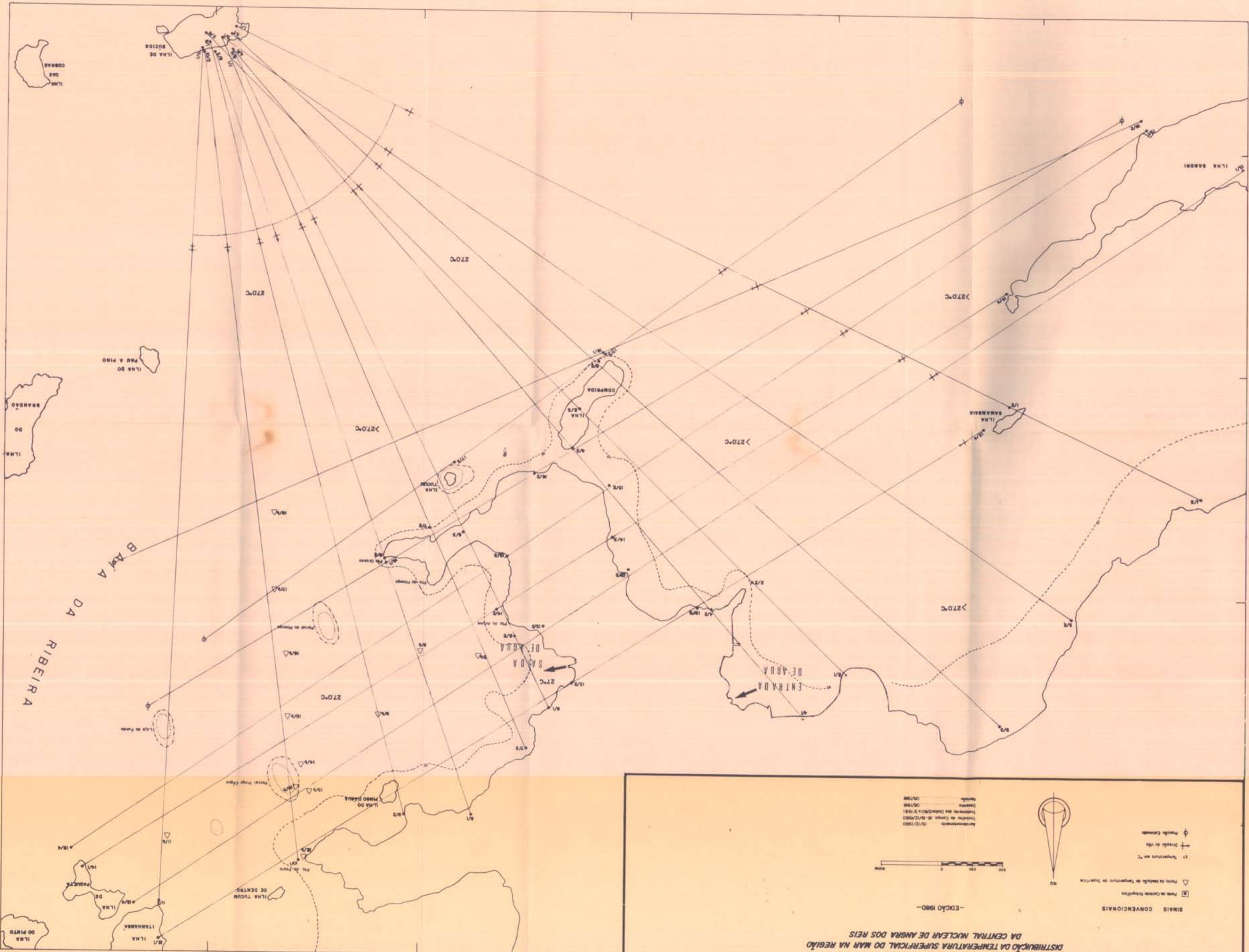
-Escala 1980-

SINAIS CONVENCIONAIS

- ☉ Ponto Estação
- ⊕ Direção de Vento
- 27 Temperatura em °C
- △ Ponto de medição de Temperatura de Superfície
- Ponto de Coleta Hidrográfica



Acquisição: 19/12/1980  
 Trabalho de Campo: 18, 19/12/1980  
 Desembo: 05/1981  
 Escala: 05/1988



### Barco

Durante o sobrevôo, uma embarcação a motor deslocou-se na área, ocupando pontos predeterminados, nos quais mediu-se a temperatura da água através de termômetros de precisão. O controle das posições do barco foi conseguido por meio de um observador instalado na Ponta Grossa (Figura 2), munido de um teodolito e de um rádio para a comunicação com o pessoal da embarcação.

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES

De acordo com Pickett (1966), diferenças de até  $1,0^{\circ}\text{C}$  podem ser encontradas entre a temperatura real da água e a obtida por radiômetros aerotransportados. Causadas principalmente pela emissividade da água e pela absorção da atmosfera interveniente, essas incertezas, sempre que possível, devem ser estimadas e corrigidas, uma vez que as variações de interesse podem ser inferiores a  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Saunders (1970) estima que a exatidão de um radiômetro aerotransportado, operando na faixa de 8,4 a  $12,2\ \mu\text{m}$ , pode ser mantida em torno de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , quando os efeitos da emissividade e absorção são corrigidos.

Com relação à emissividade, Saunders (1970) afirma que a correção deve variar entre 0,1 e  $0,6^{\circ}\text{C}$ , dependendo da cobertura de nuvens existente na área da medição. No caso do experimento ANGRA 01, o céu completamente limpo implicou a utilização de uma correção de  $0,6^{\circ}\text{C}$  nas medidas obtidas através do PRT-5.



Na faixa de operação dos sensores térmicos aerotransportados ou orbitais, o erro introduzido pela absorção se deve principalmente ao vapor d'água presente na atmosfera. Para estimar esse erro, foi calculada a quantidade total de vapor precipitável (Pr), existente sobre a área do experimento, entre os níveis de 300 e 2500 m. Inicialmente a pressão parcial do vapor (e) em cada nível foi obtida da relação (Haltiner e Martin, 1957):

$$e = e_s - \frac{C_{pd} P \Delta T}{0.622 L} \quad (2)$$

onde:  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor, obtida de tabelas, conhecidas a temperatura e pressão do ar;  $\Delta T$  é a diferença entre as temperaturas seca e úmida do ar;  $C_{pd} = 1,003 \text{ J/g}^\circ\text{K}$  é o calor específico do ar à pressão constante; e  $L = 2500 \text{ J/g}^\circ\text{K}$ , o calor latente de vaporização da água. Em seguida a quantidade de vapor d'água precipitável (Pr) foi calculada pela relação:

$$Pr = - \frac{1}{g} \int_{P_1}^{P_2} M dP = \frac{\bar{M} (P_1 - P_2)}{g} = \frac{(M_1 + M_2)(P_1 - P_2)}{2g} \quad (3)$$

no qual os índices se referem a observações feitas em níveis adjacentes;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $P$ , a pressão atmosférica; e  $M$ , a razão de mistura calculada por:

$$M = \frac{0,622 e}{P - e} \quad (4)$$

onde os valores de  $e$  foram obtidos da Equação 2, e  $P$  é a pressão atmosférica. Os valores calculados para  $P_r$  nos diversos níveis, entre 300 e 2500 m, podem ser observados na Figura 3. A integração desses valores permitiu determinar a quantidade total do vapor d'água precipitável, existente sobre a área, como sendo  $P_r(\text{total}) = 3,0$  cm. Entretanto, como este valor corresponde a uma subestimativa, em virtude da sondagem ter se limitado a apenas uma parte da coluna atmosférica, espera-se que os erros nas temperaturas obtidas através dos satélites sejam mais significativos que naquelas obtidas com o sensor PRT-5 aerotransportado.

Saunders (1970), estudando os efeitos da absorção atmosférica, na medida da temperatura, com um radiômetro aerotransportado, estabeleceu uma equação empírica para as diferenças ( $\Delta T$ ) entre as temperaturas radiométrica e real da água:

$$\Delta T = a (T_{bkt} - T_{ar}) \quad (5)$$

onde  $a$  é o coeficiente de absorção efetivo da camada atmosférica abaixo da aeronave;  $T_{ar}$ , a temperatura média dessa camada; e  $T_{bkt}$ , a temperatura real da superfície da água. Considerando-se o valor médio da razão de mistura  $M = 15,5$  g/kg na atmosfera sob a aeronave, os resultados de Saunders permitem encontrar o valor  $a = 0,25$ . Utilizando-se como valores médios para as temperaturas do ar e da superfície:  $T_{bkt} = 27,0$  °C e  $T_{ar} = 27,5$  °C, respectivamente, a equação 5 fornece o valor:  $\Delta T = -0,1$  °C para a diferença entre as temperaturas radiométrica e real da água. Considerando-se esta diferença associada àquela relativa à emissividade da água ( $\Delta T = 0,6$  °C), pode-se definir a correção total, a ser introduzida nas medidas obtidas com o PRT-5 aerotransportado, como sendo da ordem de  $0,5$  °C.

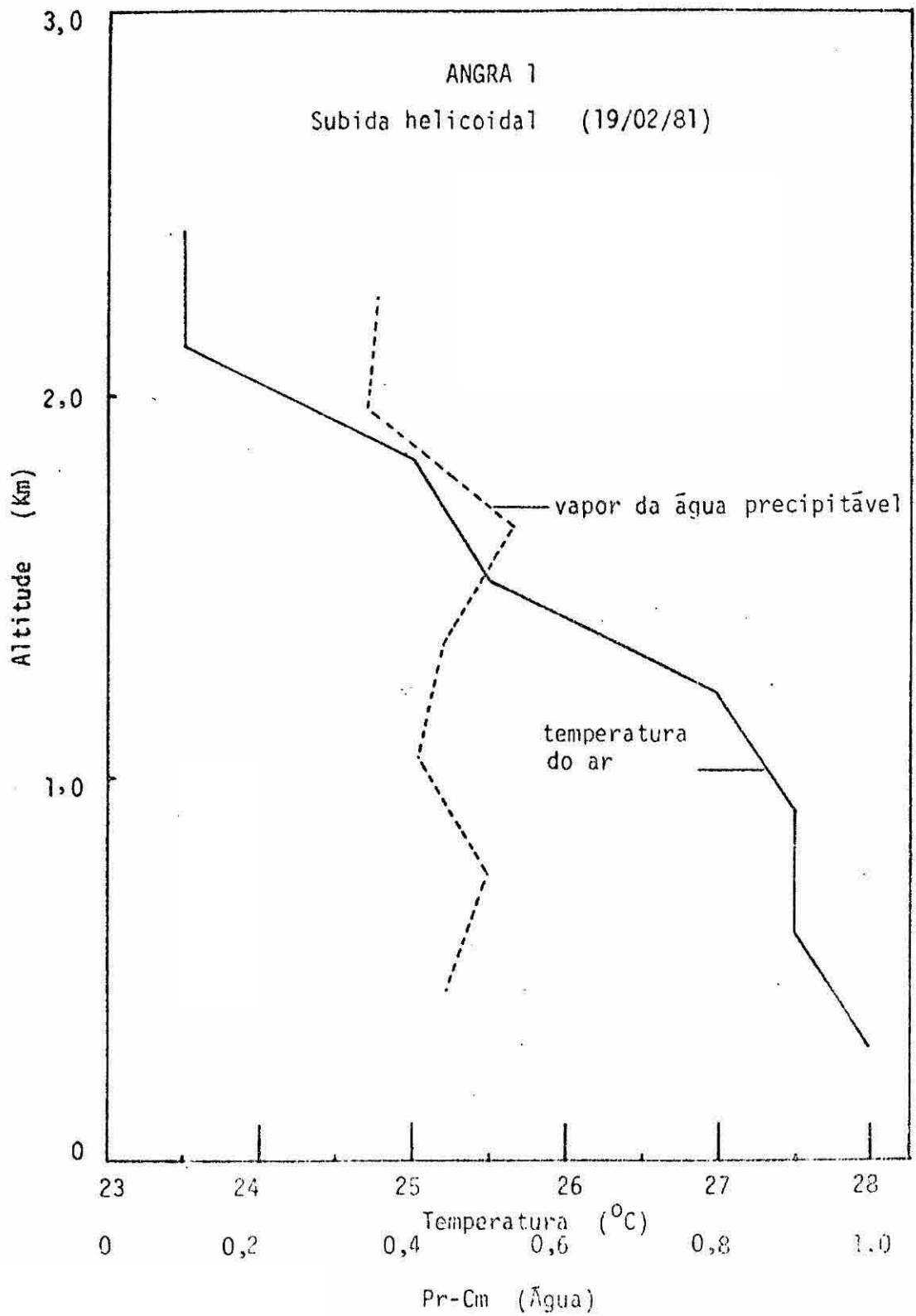


Fig. 3 - Perfil vertical da temperatura do ar e do vapor d'água precipitável.

Na prática, o resultado anterior pode ser verificado através da comparação entre as temperaturas medidas na superfície ( $T_{bkt}$ ) e as medidas através do PRT-5 ( $T_{prt}$ ). A excelente correlação obtida entre a diferença dessas temperaturas ( $T_{bkt} - T_{prt}$ ) e a radiométrica ( $T_{prt}$ ) permitiu a obtenção da equação:

$$\Delta T = 1,09 T_{prt} + 29,39 , \quad (6)$$

que foi utilizada para a correção das medidas obtidas com o PRT-5 (Figura 4); essa correção, em média, oscilou em torno de  $0,6^{\circ}\text{C}$ , o que confirmou as considerações anteriores. Esses valores da temperatura corrigidos foram então utilizados para a construção da carta térmica, observada na Figura 2.

Outra carta temática da distribuição de temperatura superficial da água, na região da central nuclear, foi gerada no Sistema de Tratamento de Imagens Digitais do INPE, como mostra a Figura 5. Utilizando a imagem gerada pelo satélite SMS-2 (09h00/19/12/80), a carta mostra a característica isotérmica da área em estudo. Neste caso, os "pixels" (elementos de resolução na imagem) associados à água costeira mais aquecida variam entre os níveis 67 e 73, o que corresponde a uma temperatura média de  $22^{\circ}\text{C}$ , portanto, com uma diferença de  $5^{\circ}\text{C}$  daquela medida na superfície. Desde que a correção estimada para a emissividade foi de  $0,6^{\circ}\text{C}$  a diferença de  $4,4^{\circ}\text{C}$  correspondente ao efeito de absorção da coluna atmosférica total. No trabalho sobre os efeitos da atmosfera na medição remota da temperatura do mar, Maul e Sidran (1973) observam que as diferenças entre as temperaturas real e obtida por satélite podem variar de  $2,2^{\circ}\text{C}$ , para uma atmosfera seca de inverno, até  $10,5^{\circ}\text{C}$ , para uma atmosfera úmida tropical no verão; as diferenças para os dados do satélite SMS-2 estão dentro desse intervalo de variação. Na Figura 5, pode-se observar ainda que a cobertura de nuvens existente nas vizinhanças da área estudada impediu que o mapeamento fosse estendido a uma maior região. Os dados gerados pelo satélite NOAA-6 foram obtidos em órbita muito baixa em relação à costa brasileira e, portanto, de reduzida utilidade no estudo realizado.

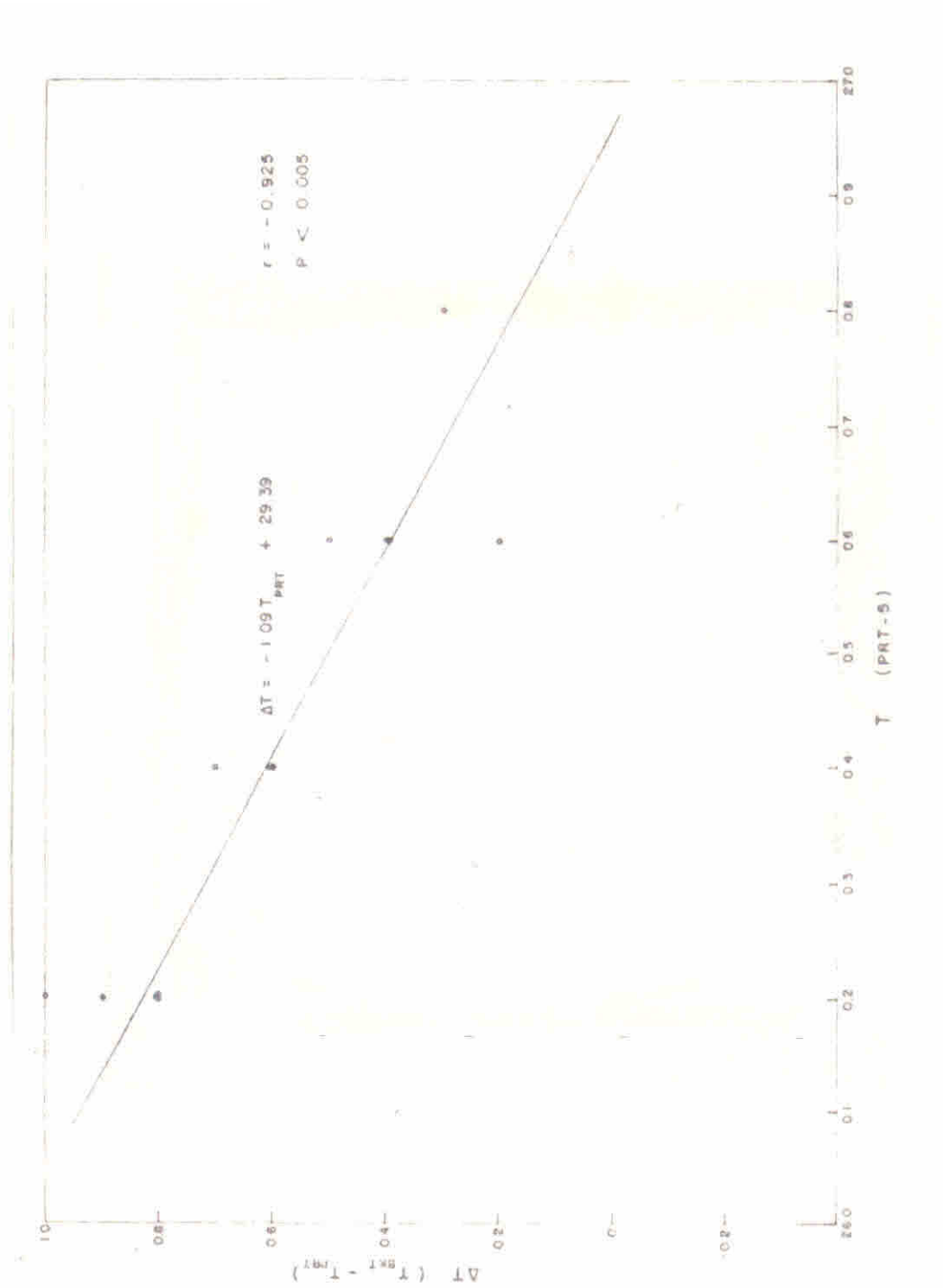


Fig. 4 - Comparação entre as temperaturas obtidas com o PRT-5 aerotransportado e as obtidas a nível de superfície.

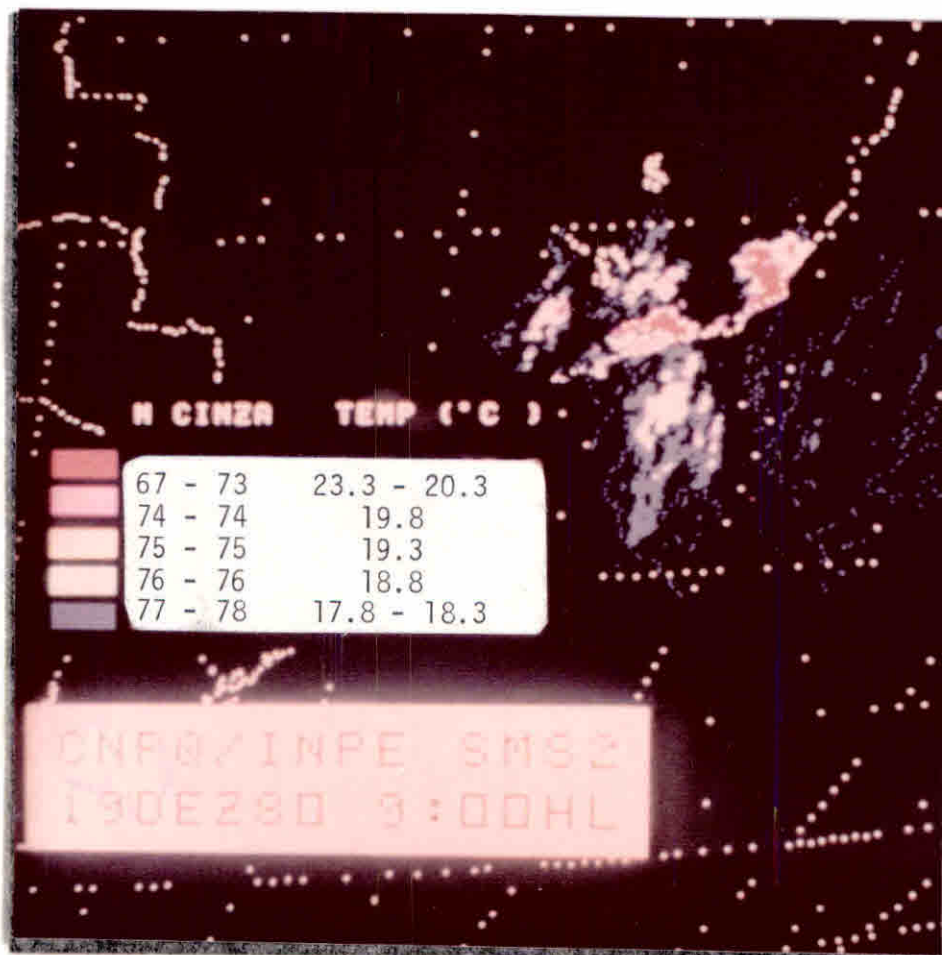


Fig. 5 - Mapa temático da distribuição de temperatura na área da central nuclear, com base na imagem do VISSR, do satélite SMS-2.



#### 4. CONCLUSÕES

Numa análise preliminar da missão ANGRA 01, podem ser evidenciadas as seguintes conclusões:

- 1) O campo de temperatura superficial da água do mar nas vizinhanças da Central Nuclear, estudado durante o experimento, é relativamente isotérmico ( $27,0^{\circ}\text{C}$ ), devendo ser alterado pela grande quantidade de água aquecida, proveniente do sistema de refrigeração do reator.
- 2) Ainda que a área estudada esteja situada em uma região de relevo movimentado, o método de navegação com pontos de controle fotográficos mostrou-se bastante eficiente para a aquisição e recuperação dos dados de temperatura radiométrica.
- 3) A correção da temperatura radiométrica, devido à absorção atmosférica, foi da ordem de  $-0,1^{\circ}\text{C}$ ; entretanto, valores mais elevados podem ser encontrados; e, nesse sentido, é desejável que nos próximos experimentos um perfil de sondagem seja realizado entre os níveis de 150 a 7000 m.
- 4) As diferenças entre as temperaturas medidas na superfície e as medidas com o PRT-5 oscilaram em torno de  $0,6^{\circ}\text{C}$  e apresentam boa concordância com o valor estimado, com base nos efeitos de absorção da atmosfera e emissividade da água.
- 5) Os dados de temperatura obtidos através do VISSR do satélite SMS-2 apresentaram-se  $5^{\circ}\text{C}$  menores que os obtidos na superfície. Esse "offset", devido aos efeitos de absorção atmosférica e emissividade da água, mostrou-se bastante razoável quando comparado com os valores previstos na literatura. Ainda que a cobertura de nuvens existente nas vizinhanças da área do experimento tenham limitado a sua utilização, estes dados apresentam boa potencialidade para a realização de um mapeamento térmico mais abrangente, na região da central nuclear.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SAUNDERS, P.M. Corrections for airborne radiation thermometry. *Journal of Geophysical Research*, 75(36): 7596-7601, Dec.1970.
- STEVENSON, M.; SQUIRE Jr, J.; BOOTH, C.; IKEDA, Y. Use of airborne radiometers for monitoring sea surface temperature and chlorophyll in coastal fishing zone. *CALCOFI Rep.*, 20: 138-142. 1979.
- MAUL, G.A.; SIDRAN, M. Atmospheric effects on ocean surface temperature sensing from NOAA satellite Scanning Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 78 (12): 1909-1916, Apr. 1973.
- HALTINER, G.J.; MARTIN, F.L. *Dynamical and physical meteorology*. New York, McGraw-Hill, 1957. 470p.
- PICKETT, R.L. Environmental corrections for an airborne radiation thermometer. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 4., Ann Arbor, MI, 1966. p.259-262.